# 日立3MeVバン·デ·グラーフ形粒子加速装置

Hitachi 3 MeV Van-de-Graaff Accelerator

末 茂\* 松 杉本光昭\* 菅ノ又伸治\*\* Shigeru Suematsu Mitsuaki Sugimoto Shinji Suganomata

#### 内 容 梗 概

バン・デ・グラーフ形粒子加速装置は核物理で研究開発された加速器で、ビームエネルギーが均一で、かつ 大幅にそのエネルギーを変えうるという利点がある。したがって放射線により高分子物質の特性を改善しうる ことが発見されてからは、電子線、X線などの発生器として盛んに使用されるようになった。

従来,国産では3MeV以上のバン・デ・グラーフを作ることは困難とされていたが,加速管内に窒素ガスを もらし,真空度を10-5 mmHg台に制御することにより,その耐圧が飛躍的に増大することが判明して,3 MeV 級も比較的容易に製作できるようになった。

#### 1. 緒 言

バン・デ・グラーフ形粒子加速装置(以下バン・デと略す)は, 高圧ガスタンク内に設置したベルト起電機式高電圧発生装置と,加 速管を主体とした真空系の装置と, 付属品としての電子走査装置, イオン分析装置,ビーム集束用の4極電磁石などより構成されてい る。

取付ける。イオンへの切替えの場合は、タンクを開け電子銃をイオ ンソースに交換し,加速管を反転する方式を採用した。この場合ス キャンナは分析用電磁石に交換する。

制御装置は,放射線防護のため別室に設置し,すべての制御は遠 隔操作できるようになっている。

2.1 加速器本体

バン・デの原理は古くから知られ、ビームエネルギーが均一でし かも大幅に変えられるなどの特長により,精密核実験に広く使用さ れてきた。第2次大戦後放射線により高分子物質の特性を改善しう ることが発見されて以来,バン・デを含む加速器の工業化の機運が 急速に高まり、各地に照射のための研究所が開設されている。

今回完成した,大阪工業奨励館納入の3MeV バン・デ・グラーフ 形粒子加速装置は、高分子照射を主目的とした高エネルギーの電子 線を得る装置であるが,必要に応じて高安定度のイオン線も得られ るようになっている。おもな仕様は次のとおりである。

電子線の場合

定格加速電圧	3 M V
電圧安定度	$\pm 60 \ \mathrm{kV}$
定格加速電流	$200 \ \mu A$
電流安定度	$\pm$ 4 $\mu$ A
ビーム直径	約 10 mm ø
イオン線の場合	
定格加速電圧	3 M V
電圧安定度	$\pm~6~\mathrm{kV}$
定格加速電流	$\rm H^{+}~20~\mu A$
電流安定度	$\pm$ 5 $\mu { m A}$
ビーム直径	$1 \sim 10 \text{ mm}\phi$

以下,その一般的な設計,加速管,ベルト,ビームの集束系,制 御回路の順に概要および特性について述べる。

## 2. 一般的設計

本器は照射研究が主目的であるので、本体を2階に設置し、1階

第1図(a), (b)は現地に据付けられた3MeV バン・デの外観であ る。(a)はバン・デ本体でタンク内には高圧電極,絶縁コラム,加 速管,ベルト駆動用電動機がある。(b)はバン・デ本体の下部を示 すもので,加速管用真空装置,X線ターゲットなどが取付けられて いる。(スキャンナの代りにX線ターゲットを取付けた場合である) 高圧タンクは、厚鋼板熔接構造とし、X線による探傷および、最 高使用圧力 24 kg/cm<sup>2</sup> に対し 1.5 倍の水圧試験を行い,いささかも 不安のないものとした。また高圧電極に内蔵する器具は特殊な発振 管や継電器を除き,いっさい真空管は使用せず,半導体整流器を採 用した。

また高圧タンク内の各種調整は,タンクに内蔵したセルシンと絶 縁棒によりすべて操作室から遠隔操作できる。

ベルトの速度は約20m/sとし2台の3.7kW(5HP), 3,000 rpm の電動機で駆動している。絶縁コラムは分割積上げ方式とし、各段 にコロナ防止用フープを設け,分圧抵抗と火花ギャップの併用によ り電位分布を均等にして、異常電圧を防止している。

さらに加速管自体にも別に異常電圧保護用火花ギャップを取付 け,また加速電極とフープとの間は電極側にサージが浸入しないよ うインダクタンスを持ったバネで接続した。

封入ガス圧が20kg/cm<sup>2</sup>にも達すると、コロナギャップによる分 圧は不完全になるので,抵抗分圧として分担電圧を均等ならしめ た。抵抗は耐湿性,耐コロナ性向上のため特殊樹脂加工を施した上, 高電圧をかけたままフォーメーションを行い、抵抗値の安定を図っ た。

絶縁コラムは3ブロックに分割し、各ブロックは短冊形の支持が い子とフープを接着したものからなっており、ブロック間は精密に 仕上げられた継ぎ金具で結合されている。フープは精度の高い絞り 加工により製作し,外周にはコラムの静電遮へいと表面電界強度を 小さくするためのコロナシールドリングが巻いてある。 加速管およびベルトはともにバン・デの性能を左右するものであ り、その構造特性についての詳細は別項に述べる。 電子銃は第2図に示すような特殊な結線方式とし、アノードを取 り除き加速管だけの集束作用を応用して, 10mm / 程度の細いビー ムを得ることに成功した。

を照射室とするのに便利な縦形構造とした。タンクは2分割とし, ホイストのつり上げ高さを極力低くした。ガス圧は、発生電圧が高 く、ビーム電流が多いなどの理由により、日立中央研究所設置の1.5 MeV バン・デ<sup>(1)</sup>よりもさらに高い 20 kg/cm<sup>2</sup> とした。 電子照射の場合は,加速管頂部に電子銃を,下部にスキャンナを 日立製作所国分工場 \* \*\* 日立製作所日立研究所

2008 昭和36年11月

日

V/

評 論

第 43 巻 第 11 号





第1図(b) 真空装置およびX線ターゲット

2.2 ベ ル ト
2.2 ベ ル ト
2.2.1 概 説
ベルトは高圧電極内に電荷を運ぶもので、3 MeV 器では電動機
2 台に直結したプーリで駆動される。走行速度は約20 m/s(60c/s
の場合)で、心地の上に比較的抵抗値の低いゴムをモールドした
ものでエンドレスである。
ベルトのバタツキを少なくし、コラムの振動を少なくするため、
ベルトフープの隔段にベルトスペーサを入れる。
ベルトスペーサはベルトとベルトフープの間隔を一定に保つ役

第3図 上部集電子取付位置

目をすると同時に、ベルトの電荷がコラムに飛び移らないように している。

バン・デ運転中のベルトは,下記のような過酷な条件下に置か れている。

(1) 乾燥高圧ガス中を20m/sで運動する。

(2) ベルトの縦方向には強い電界がある。

- (3) ベルトの表面には高密度の電荷が付着している。
- (4) ベルトの表面裏面を問わず,各部との摩擦により電荷が 誘起される。

したがって、ベルトを単独に外部に取出し、単なる静特性を測 定してベルトの優劣を論ずることはできないので、ベルト試験は 全部バン・デに取付けて行なった。

#### 2.2.2 荷電,集電と短絡特性

下部散布子でベルト上に荷電された電荷が,100%上部で集め られることが望ましいが,ベルト表面の凹凸,集電の機構などに よって取残しが生ずる。正電荷を選ぶ場合は比較的問題はない が負電荷の場合には,上部集電子で集められず下にもどってくる 電荷が比較的多くなる。特に高気圧になるとこの傾向がはなはだ しく電荷の損失増加を招くばかりでなく,ベルトの沿面放電を起 す確率が増加する。

この傾向を軽減するために,上部集電子に電圧を印加し,ベル トに逆符号の電荷をのせるのが普通であるが,装置および操作が 複雑になる。

われわれは,バン・デの荷電,集電機構について種々研究してき たが,第3図に示すような配置にして集電効率の向上を図った。 すなわち第4図に示すように,正負の電荷いずれの場合でもほと んど100%の集電放率となっている。 一般に,荷電,集電が困難になる高気圧においても第5図に示 すように100%の集電効率が得られた。 また,ガス圧とともに飽和短絡電流が大きくなることも認めら れ,15 kg/cm<sup>2</sup>の圧力では,大気圧の約3倍の飽和短絡電流が得 られた。



![](_page_2_Figure_2.jpeg)

第5図 高気圧における短絡特性

### 2.2.3 電 圧 特 性

6

一般に加速器本体の絶縁耐力は絶縁コラムが最も高く、ベルト, 加速管の順になっているのが普通である。したがって,加速管な しの発生電圧試験を行い,各部の絶縁強度を調べて,その使用限 界を知る必要がある。この場合,前述のようにベルト上の電荷は 強い縦方向の電界のために,すべりを生ずることがある。これは ベルトの材質,表面の仕上げなどの問題がからみ合って非常に複 雑な現象を呈する。

バン・デを工業的に使用する場合には、照射などで長時間運転 する場合が多い。この時、タンク内の温度が上昇してラジアルス パーク、ベルト沿面放電を起しやすくなるので、適当な冷却を行 わなければならない。

タンク内の絶縁ガスを、冷却装置を通して循環させる方法もあるが、20 kg/cm<sup>2</sup> 程度の高気圧になると、装置も大形、複雑にな

![](_page_2_Figure_9.jpeg)

第7図 ガス圧力一発生電圧の関係

的表面抵抗,体積固有抵抗の高いゴムベルトを使用していたが, この場合には,内側集電子電流が多く,ことに沿面放電を起す直 前では7~11 µA に達していた。

これは次のような理由によるためと推定される。

(1) ベルト1回転による摩擦電荷が,表面電荷と代数的に合算されることなく,そのまま全て内側集電子に集められている。
(2) プーリ部で発生した,摩擦電荷の一部はプーリにもどることなくそのまま裏面電荷となって,ベルトに付着する。

(3) 表面電荷も一様でなく,局所的に高密度部分があるため 沿面放電を起しやすくなる。

— 13 —	
使用するのが最も簡単である。3 MeV 品では 2.2 KW (3 m)の ものを用いているが,室温 20℃ 位のとき,2 時間で 11℃ に下が り,バン・デ2 時間連続運転で3℃程度上昇する。 発生電圧試験は <b>第6</b> 図のような結線で行い,下降側ベルトの裏 面に内側集電子を取り付けて行った。最初,3 MeV 器では,比較	レトの沿面放電は見られなくなった。第7図に発生電圧とガス圧の関係を示す 正電圧の場合は3.5 MV以上でラジアルスパークを起し、負電
ってくる。またドライアイス法は長時間ではドライアイスの量が 変化して冷却が一様でなくなる。したがって、フレオン冷凍機を 使用するのが是す範囲でする。2 MoV 男では 22kW (2 HP)の	以上の現象は,絶乾状態でのベルト抵抗値が非常に高いためと 思われたので,比較的抵抗値の低いゴムベルトを試作,使用した トニム 内側集雪子電流は 0~1 #A トなり 発生電圧 A ト見しべ

![](_page_3_Figure_0.jpeg)

▲ 真空度 1.5×10<sup>-6</sup> mmHg でローディング開始電圧 1.9 MV の場合 ● 真空度 1.5×10<sup>-6</sup> mmHg でローディング開始電圧 2.3 MV の場合

第9図 真空度とローディング開始電圧

現在, 3 MeV 器, 5 MeV 器ではともにこの低抵抗のベルトを 使用しており, 沿面放電の問題は全く解決している。

#### 2.3 加速管

加速管は、内部を電子またはイオンが高速で走るもので、管内は ビームの散乱と、加速電極間の放電を防ぐため、高真空に排気され ている。本器で使用した加速管は**第8**図で示されるように、漏斗状 に絞ったアルミニウムの加速電極とガラス管を交互に接着したもの からなっている。

### 2.3.1 加速管のフォーメーションおよび極性効果

加速管が高真空になると、その構成部品から残留ガスが放出され、放電に悪影響を与えることは良く知られている。このために も加速管のフォーメーションは非常に慎重に行わなければならない。特に、使用始めにはガスの放出が多く、長時間かけて行う必要がある。

加速管のフォーメーションの度合を見るためには, ローディン グ開始電圧を見れば容易にわかる。ローディングは, 電極や接着 剤から放射された電子が加速され, 管中を走り正電圧発生の場合 には加速管頂部付近で, 負電圧発生の場合には加速管の下でX線

#### 第10図 電子線の集束系

グ開始電圧が,負のそれよりも幾分高いことが判明した。このため3 MeV 器では,電子加速とイオン加速では,加速管を反転して使用している。

## 2.3.2 ローディング開始電圧と真空度の関係

前述のように、ローディングの認められる加速管は、管内の真 空度を制御することにより、その耐圧が上昇し特性が著しく改善 されることが知られている<sup>(2)</sup>。

3 MeV 器では窒素ガスを接地側より管内に導入し, ローディン グ開始電圧を高めている。この開始電圧は加速管のフォーメイシ ョンの度合,使用履歴などによっていくぶん異なるもので,この ようすは**第9**図のとおりである。たとえば $1.5 \times 10^{-6}$ mmHg で, ローディング開始電圧 1.9 MV のとき,真空度を徐々に悪くして 4×10<sup>-4</sup>mmHg にすると開始電圧は 3.1 MV に達する。また同 じ真空度で2.1 MV のときは、3.2 MV に達する。

一般に、加速管内の真空度が下がるとビームの散乱が起るが、 7~8×10<sup>-5</sup> mmHg まではビームの集束もよく発散は認められな かった。管内真空度をさらに下げると耐圧も上昇すると考えられ るが、10<sup>-4</sup>mmHg の領域ではビームは散乱し、かつ、普通の気中 放電が起り、加速管を破損するおそれがある。

を発生する現象である。これには臨界電圧があって,これ以上に なるとX線強度は急速に強まる。このほか,ローディング開始電 Eに達すると加速管内部は電子やイオンの衝撃を受けて出てくる ガスのため真空度が悪くなる。したがって加速管のフォーメーシ ョンの度合を見るためには,除々に発生電圧を上昇させ急速に真 空度の悪くなる点を取れば容易に判定できる。 また,加速電極が下向きに絞られている場合,正のローディン

3. ビームの集束系

3 MeV 器は電子加速とイオン加速に使用する場合があるので,集 東系も使用目的に応じて設計されている。

3.1 電子加速の場合

----- 14 -----

電子加速は照射が主目的であるから,ビーム直径は比較的大きく てよい。したがって,特に複雑な集束系とせず第10図に示すよう

![](_page_4_Figure_1.jpeg)

1

第11 図に示すとおりで、イオンソース<sup>(3)</sup>、 集束電極、加速管、分析電磁石、4極電磁 石の集束系の組み合わせからなっている。 プローブ電圧により、カナールから押し出 されたイオンは集束電極によりいったん集 束され、つぎに発散ビームとなって加速管 にはいり、加速電極の集束作用により、分 析電磁石入口スリット付近に結像する。加 速管でのビームの集束は Elkind の式<sup>(4)</sup> に よる計算とほぼ一致する。

2011

電磁石磁場にに入ったビームは,磁場の 入口,出口に設けられた回転シムにより二 方向集束を受けて出口スリット付近に結像 する。

さらに,ビームは水平にビームダクトを 走り,ターゲットに達する。この間の集束 は4極電磁石で行われる。

工場試験では4mの所に結像させたが集 束は非常によく,出ロスリット付近で1 mmø程度のものが得られ,ターゲット 上では2mmø以内に集束した。電流は電 磁石入口で60μAが得られ,H<sub>1</sub>+ビームは 60%以上であった。

![](_page_4_Figure_6.jpeg)

**第12図は、出口スリットより約4mの** 先に厚いベリリウムターゲットを着け、エ ネルギー安定度 ±0.2%の H<sub>1</sub>+ビーム 3 / A で衝撃して得られた B<sup>9</sup>(pn) B<sup>9</sup> 反応<sup>(5)</sup>の励 起曲線である。

#### 4. 高電圧制御

バン・デは高圧電極の対地容量に蓄えら

れる電荷によって、所定の高電圧を発生するもので、ベルトで輸送 される電荷は高圧電極が電圧を維持するに必要な量、ビーム電流お よびブリーダ電流などと平衡するものである。一定電荷が輸送され ている条件下ではビーム電流が変動すると、電極電圧は直接その影 響を受ける。第13 図は3 MeV バン・デについて求めたもので、同 図の(スタビライザなし)の場合から電力回路現象のように負荷電流 が100% 変動すると、その電圧は10% 程度変化するといったもの と、全く趣きを異にし、定格ビーム電流の数パーセントの変動で電 圧は100% 変化すると考えてよい。

安定な加速電圧を得るために、3 MeV バンデでは回転電圧計によ る検出電圧をプリアンプ・交流および直流増幅器にて増幅し、その 出力を荷電電源の入力電圧を調整する可飽和リアクトルの制御巻線 に導き、これのリアクタンス電圧を制御してベルトの電荷輸送量を 変化させる方式を採用した。またイオン加速の場合は高圧電極と高 圧タンク内壁の間に針状電極を対向せしめ、このコロナ放電量を電 子管(2C53)で制御する。コロナポイント<sup>(6)</sup>の制御を併用して高 精度を得ている。この検出点はイオンビーム偏向電磁石の出口に設 けた2個の絶縁された金属製スリットの間げき(エネルギー安定度

に簡単なものとした。電子銃のウエネルトに引出し電圧をかけ、こ れで加速管内にはいった電子は、加速電極で形成されているレンズ により絞られ加速されてスキャンナ窓に達する。この方法でも集束 は非常によく、10 mm Ø 程度で、現在では、3 MeV、300 µA の電流 を容易に取出している。 3.2 イオン加速の場合 電子加速と違い、イオン加速の場合は非常に複雑で、その概略は

---- 15 -----

±2/1,000のイオンビームを得るには約2mmに絞られる)を通過する前にビームの拡がりによって各スリット片に当るビームの差を差動増幅器により増幅している。第14図は3MeVバン・デの高電圧制御系のブロック線図を示す。また第15図は電子加速3MV,ビーム200µA,連続1時間の実測値で良好な特性を示している。

### 5. 分析電磁石電源

精密核実験の基準は分析電磁石の磁場で,その電流安定度は± 2/10,000 が必要とされる。この電磁石電源には3kW,200V の電 動直流発電機を使用し,これを交流増幅器を主体とする電子管制御 装置で制御している。電動発電機にはフライホイールをつけて十分 その効果をもたせ,また出力電圧の回転リップルも25c/s,1%程 度のものを使用した。電子管装置は機械式チョッパで水銀電池によ る基準電圧とマンガニン製抵抗による検出電圧を比較する方式をと っている。第16回は電子管制御装置,第17回は分析電磁石電流の 実測値を示す。

#### 6. 電子線走査装置

高エネルギー電子線の走査は,加速管の下部に配置した走査用コ イルに三角波電流を流し,電子を偏向させて行う。コイル中心と被

![](_page_5_Figure_5.jpeg)

照射物の距離は約1mで,走査幅は30cmである。

なお,くり返し周期は被照射物を輸送するコンベヤ速度を考慮し て200c/sとした。第18回は走査電源装置,第19回は走査コイル電 流波形の実測値を示す。電子線を一様に走査するために,コイル形 状,コイル配置および電流波形の非直線度などに考慮を払った。

#### 7. 運転および人体防護

3 MeV バン・デでは運転および測定のいっさいを放射線から十分 防護された運転室から行なえるようにした。 第20 図 は制御机で操 作スイッチ・メータ類など遠隔監視に必要なものを取付けてある。 なお本体室または照射室へのドアには運転操作回路との間に厳重な 鎖錠装置を設け,運転中誤って危険な照射室に立入ることのないよ

![](_page_5_Figure_10.jpeg)

第14図 高電圧制御系ブロック線図

![](_page_5_Figure_12.jpeg)

第16図 電子管制御装置

![](_page_5_Figure_14.jpeg)

第13図 発生電圧と負荷電流の関係

![](_page_5_Figure_16.jpeg)

----- 16 -----

# 第15図3MeVバン・デ電圧・電流特性

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

第19図 走査コイルの電流波形

![](_page_6_Picture_4.jpeg)

が許容値以上になるとこれを検出して 運転を自動的に停止するようになって いる。検出器には日立 RDM-3 形安全

以上,日立3MeVバン・デの概要を 説明したが,国産では製作困難とされ ていたバン・デも,加速管ローディン

グの対策としてのガスリークの採用,および低抵抗ベルトの使用に